

外伶仃海洋牧场附近海域沉积物重金属分布特征及生态风险评价

冯雪¹, 佟飞^{1,2}, 袁华荣¹, 赵学乾³, 陈丕茂^{1,2}

1. 中国水产科学研究院南海水产研究所/农业农村部南海渔业资源环境科学观测实验站/农业农村部海洋牧场重点实验室, 广东广州 510300
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东珠海 519000
3. 济南市公园发展服务中心, 山东济南 250100

摘要: 沉积物是承载地球演化历史和人类活动变迁信息的地质物质。为了解海底表层沉积物的污染状况及生态风险, 以外伶仃海洋牧场附近海域沉积物为研究对象, 分别于 2020 和 2021 年测定该海域沉积物的粒度、特征指标及 6 种主要重金属元素的含量。采用内梅罗污染指数法、潜在生态风险指数法和地累积指数法对重金属的潜在生态风险进行了评价, 同时探讨了重金属的可能来源。结果显示, 调查海域沉积物的主要类型为粉砂质黏土, 各元素含量空间差异较大, 整体随离岸距离的增加而逐渐降低。6 种重金属含量均与有机碳正相关。3 种生态风险评价方法所得出的评价结果基本一致, 高污染区主要位于外伶仃岛东北原人工鱼礁建设范围海域。内梅罗综合污染指数结果显示调查海域沉积物整体属 1 级清洁水平。潜在生态风险指数表明重金属汞(Hg)在评价中所占权重最大, 潜在风险系数和地累积指数明显高于其他重金属。研究表明, 调查海域沉积物重金属生态风险整体处于低风险, 但仍需对重金属尤其是 Hg 保持高度关注。

关键词: 海洋牧场; 沉积物; 重金属; 生态风险评价; 外伶仃

中图分类号: S 931.3

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments in adjacent waters of Wailingding marine ranching

FENG Xue¹, TONG Fei^{1,2}, YUAN Huarong¹, ZHAO Xueqian³, CHEN Pimao^{1,2}

1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/Scientific Observing and Experimental Station of South China Sea Fishery Resources and Environments, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Key Laboratory of Marine Ranching, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510300, China
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519000, China
3. Jinan Park Development Service Center, Jinan 250100, China

Abstract: Sediment is the geological material that carries information of the evolution history of the earth and the changes of human activities. In order to understand the current situation and ecological risk of sediments, based on the survey data of 2020 and 2021 in adjacent waters of Wailingding marine ranching, we investigated the contents of particle size, characteristics indexes and six heavy metals. By using Nemeru comprehensive pollution index, potential ecological risk index and geo-accumulation in-

收稿日期: 2024-05-09; 修回日期: 2024-09-02

基金项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)资助项目(SML2023SP237); 广东省重点领域研发计划项目(2020B1111030002); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2023TD06)

作者简介: 冯雪(1987—), 女, 助理研究员, 博士, 研究方向为海洋牧场及生态修复。E-mail: fengxue@scsfri.ac.cn

通信作者: 陈丕茂(1969—), 男, 研究员, 研究方向为海洋牧场及渔业资源保护与利用。E-mail: chenpm@scsfri.ac.cn

dex, we evaluated the potential ecological risk of heavy metals. Furthermore, we discussed the possibility of heavy metal sources. The results indicate that the main type of sediments in the survey sea area was silty clay, with significant spatial differences in the content of various elements, showing a gradually decreasing trend with the increase of offshore distance. All the six heavy metals had a high positive correlation with total organic carbon. The assessment results obtained by three ecological risk assessment methods are basically consistent: the high pollution area was mainly located in the artificial reef construction area, northeast of Wailingding. The results of the nemero comprehensive pollution index show that the sediment was at Level 1 of cleanliness. The potential ecological risk index shows that Hg had the highest proportion in the evaluation, and its potential risk coefficient and ground accumulation index were significantly higher than those of other heavy metals. The results reveal that the ecological risk of heavy metals in the sediments is generally at low level, but heavy metals, especially Hg, still needs to be highly concerned.

Keywords: Marine ranching; Sediment; Heavy metal; Ecological risk assessment; Wailingding

海洋是人类获取优质蛋白的重要粮仓,是补充和丰富居民营养膳食结构的重要途径之一。作为大国海洋战略的组成部分,发展海洋牧场是探索新型海洋渔业发展方式的途径和举措。1983年冯顺楼^[1]提出“投放人工鱼礁是开创海洋渔业新局面的重要途径”,以人工鱼礁建设为载体的海洋牧场在我国逐步发展壮大。2015年起农业农村部组织开展国家级海洋牧场示范区的申报及建设工作,截至目前已批复9批合计189个国家级海洋牧场示范区。2018年12月,广东省珠海市外伶仃海域国家级海洋牧场示范区入选第4批国家级海洋牧场示范区(农业农村部公告第115号),位于珠江口万山群岛中北部的伶仃岛东部海域,海域面积9.83 km²。

重金属通常指密度在5 g·cm⁻³以上或原子质量大于55的金属^[2],其污染是目前世界上最严重和关注度最高的环境风险之一,重金属通过水动力、食物链传递及地球化学过程等途径,在水体、沉积物及生物体内均可迁移和蓄积。人工鱼礁投放是养护型海洋牧场建设中的重要环节,礁体投放后产生的上升流使部分沉积物质重新释放至水体中,还会形成沉积物扩散的阻滞效应,这一特性体现了沉积物在元素循环中既可作为吸纳宿主,也可作为释放源头的特殊地位^[3]。目前对于海湾及近岸海域沉积物的污染状况已有一定研究^[4-5],按海区分有黄渤海区辽宁营口鲅鱼圈海域^[6]、大长山海洋牧场^[7]、大神堂人工鱼礁区^[8]、东海区海州湾海洋牧场^[9]、马鞍列岛人工鱼礁^[10]等。针对珠海外伶仃岛的研究主要有海洋牧场选址^[11]、资源动态变化和养护效果评价^[12-13]、海滩修复^[14]等,但关于南海区小尺度典型岛礁海洋牧场建设海域沉积物重金属污染状况的研究尚未见报道。

本研究以珠海外伶仃海洋牧场表层沉积物为主

要研究对象,重点分析重金属元素分布状况并评估潜在生态风险,以期摸清海洋牧场建设对流场调节和物质运输的生态作用和附近海域重金属污染的影响风险,更好地提出有针对性的现代化海洋牧场建设和管理策略,为珠海外伶仃海洋牧场建设及海域生态环境修复提供理论支持和参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于珠海市外伶仃岛附近,包括广东省珠海市外伶仃海域国家级海洋牧场示范区及其邻近海域。2020年9月在外伶仃岛周边附近海域布设调查站位,站位分布涉及外伶仃海洋牧场(原人工鱼礁区A、示范区人工鱼礁区B、示范区礁区外海域C)、示范区附近海域D₁。2021年9月主要针对外伶仃岛东部的伶仃海洋牧场示范区及其东侧海域布设调查站位(包括海洋牧场示范区A—C及示范区附近海域D₂)。依据章守宇等^[15]的研究结果,鱼礁流场效应范围不超过礁体规模的50倍,故在距离礁区5.6 km的区域,设置东侧示范区周边断面区域D₂,具体采样站位所涉区域范围见图1。

1.2 样品采集与分析

样品采集和分析严格依据《海洋监测规范 第3部分:样品采集、储存与运输》(GB 17378.3—2007)、《海洋监测规范 第5部分:沉积物分析》(GB 17378.5—2007)、《海洋调查规范 第8部分:海洋地质地球物理调查》(GB 12763.8—2007)及其他相关方法执行。

1.2.1 样品采集

沉积物调查包括pH、粒度、总有机碳(Total organic carbon, TOC)、硫化物及重金属铜(Cu)、

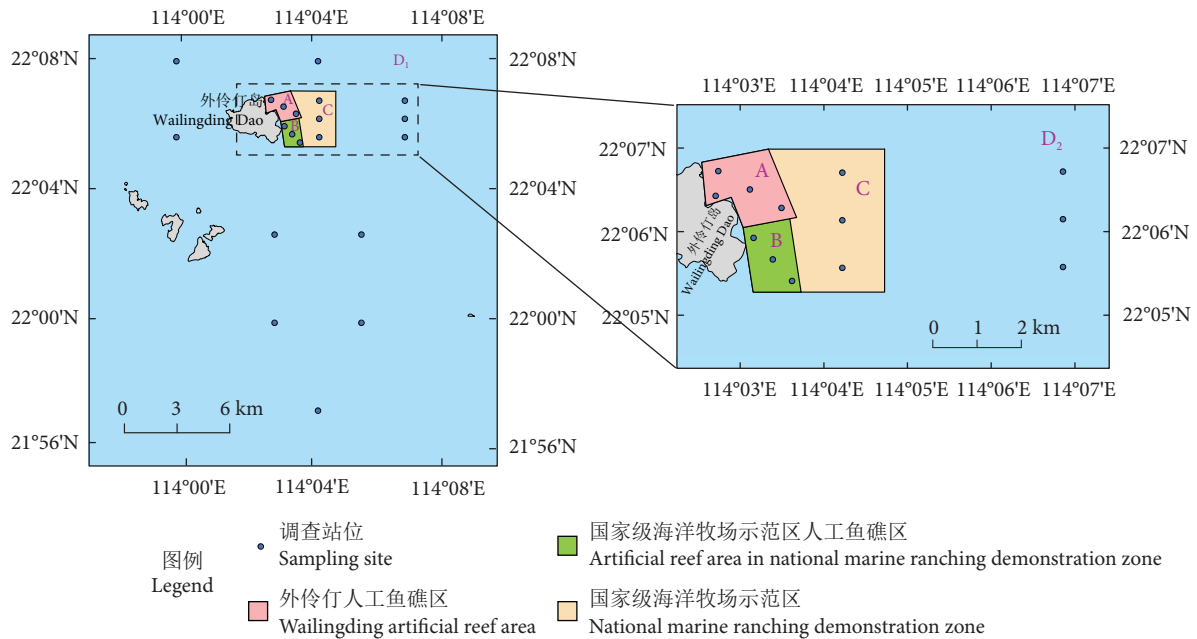


图1 研究区域示意图 (左: 2020 年, 右: 2021 年)

Fig. 1 Diagram of survey area (Left: 2020; Right: 2021)

铅 (Pb)、锌 (Zn)、镉 (Cd)、汞 (Hg)、砷 (As) 等。采用抓斗式采泥器采集表层沉积物 2 次, 打开采泥器前轻斜置, 使抓斗内的积水缓慢流出, 现场观察样品状态 (颜色、气味等), 如无异常即取上层泥样分别封存在聚乙烯袋 (测定 Cu、Pb、Zn、Cd、As) 及磨口广口瓶 (测定 Hg、硫化物、粒度、TOC) 中并记录海区、编号、日期等信息, 后放于装有冰块的保温箱, 上岸后运回实验室处理测定。

1.2.2 样品分析

沉积物粒度采用筛分分析法结合激光粒度分析仪测定, Cu、Pb、Zn、Cd 采用原子吸收分光光度法测定, Hg 和 As 采用原子荧光法测定。分析样品插入标准物质样及质控站双平行样进行质量控制, 回收率为 88.5%~100%, 符合分析要求。

1.3 评价方法

1.3.1 变异系数法

变异系数是反映数据离散程度的归一化量度, 通常用于判别所评价元素受外力作用产生影响程度的高低。一般认为 <15% 为低变异, 15%~36% 为中等变异, >36% 为高度变异^[16]。变异系数计算公式为:

$$CV = \frac{SD}{\bar{X}} \times 100\% = \frac{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 / n - 1}}{\bar{X}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: CV 为重金属元素的变异系数; SD 为该元素的标准差; \bar{X} 为该元素的均值; X_i 为第 i 个重金属元素的结果; n 为重金属总数据量。

1.3.2 内梅罗污染指数法

内梅罗污染指数法是当前综合污染指数计算中最常用的方法之一, 兼顾了污染评价的极值和均值, 能更全面反映多因素影响条件下的综合污染状况, 突出体现高权重污染因子的作用^[17], 是一种多因子兼计权重型污染评价方法。内梅罗污染指数法计算公式为:

$$P = \sqrt{\frac{(F_{\max})^2 + (F_{\text{avg}})^2}{2}} = \sqrt{\frac{\left[\left(\frac{C^i}{C}\right)_{\max}\right]^2 + \left[\left(\frac{C^i}{C}\right)_{\text{avg}}\right]^2}{2}} \quad (2)$$

式中: P 为内梅罗综合污染指数; F_{\max} 为沉积物重金属污染指数最大值; F_{avg} 为沉积物重金属污染指数平均值; C^i 为沉积物重金属 i 的实测含量; C 为沉积物重金属 i 的评价标准值。调查海域位于万山群岛保留区及旅游休闲娱乐区内, 采用《海洋沉积物质量》(GB 18668—2002) 中第一类沉积物质量标准进行评价。具体污染评价分级标准见表 1。

1.3.3 潜在生态风险指数法

1980 年 Hakanson 提出生态风险指数法^[18], 是一种依据重金属的理化性质和环境相互作用来评价污染程度及其潜在风险的方法, 综合潜在生态风险指数计算公式为:

$$RI = \sum E_r^i = \sum (C_f^i \times T_r^i) = \sum \left(\frac{C^i}{C_n^i} \times T_r^i \right) \quad (3)$$

$$C_d = \sum C_f^i \quad (4)$$

表1 内梅罗污染指数评价分级

Table 1 Classification standard and evaluation of Nemerow pollution index

质量等级 Level	内梅罗综合污染指数 Nemerow pollution index	污染水平 Pollution level
1级 Level 1	$P \leq 0.7$	清洁
2级 Level 2	$0.7 < P \leq 1.0$	较清洁
3级 Level 3	$1 < P \leq 2$	轻度污染
4级 Level 4	$2 < P \leq 3$	中度污染
5级 Level 5	$P > 3$	重度污染

式中: RI 为综合潜在生态风险指数; E_i^j 为重金属 i 的潜在生态风险系数; C_i^j 为重金属 i 的污染指数, 代表单一元素的污染程度; T_i^j 为重金属 i 的毒性响应系数; C_d 为重金属综合污染系数; C^i 为重金属 i 的实测含量; C_n^i 为重金属 i 的背景值; 本研究采用南海陆架区表层沉积物重金属含量为参比值^[19] (表 2)。由于 Hakanson 提出的评价等级划分是基于 8 种污染物参数的^[18], 本研究的参数未包含多氯联苯 (PCB) 及铬 (Cr), 因此根据实际情况对 RI 等级进行调整, 评价标准见表 3。

表2 重金属毒性响应系数及重金属背景值

Table 2 Toxicity response coefficient and background values of heavy metals

评价指标 Evaluation index	铜 Cu	铅 Pb	锌 Zn	镉 Cd	汞 Hg	砷 As
毒性响应系数 T_i^j Toxicity response coefficient	5	5	1	30	40	10
重金属背景值 C_n^i Background value of heavy metal/(mg·kg ⁻¹)	7.43	15.60	54.40	0.18	0.02	9.71

表3 潜在生态风险评价标准

Table 3 Evaluation standards of potential ecological risks

综合污染系数 C_d		潜在生态风险系数 E_i^j		综合潜在生态风险指数 RI	
评价指标 Evaluation index	评价结果 Evaluation	评价指标 Evaluation index	评价结果 Evaluation	评价指标 Evaluation index	评价结果 Evaluation
$C_d < 6$	1级 Level 1	$E_i^j < 40$	轻微	$RI < 90$	轻微
$6 \leq C_d < 12$	2级 Level 2	$40 \leq E_i^j < 80$	中等	$90 \leq RI < 180$	中等
$12 \leq C_d < 24$	3级 Level 3	$80 \leq E_i^j < 160$	较强	$180 \leq RI < 360$	强
$C_d \geq 24$	4级 Level 4	$160 \leq E_i^j < 320$	很强	$RI \geq 360$	极强

1.3.4 地累积指数法

科学家 Müller 提出的地累积指数法广泛用于沉积物重金属的污染程度评价^[20], 公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C^i}{k \times C_n^i} \right) \quad (5)$$

式中: I_{geo} 为重金属 i 的地累积指数; C^i 和 C_n^i 同上; k 为考虑各地岩石背景值差异的校正系数。依据 I_{geo} 可分为清洁至极严重污染 7 个等级^[21], 具体划分标准见表 4。

2 结果

2.1 表层沉积物重金属现状及空间分布特征

2020 和 2021 年调查中, 表层沉积物的重金属

表4 地累积指数和重金属污染等级划分标准

Table 4 Classification for heavy metal pollution level and geo-accumulation index

评价等级 Level	地累积指数 I_{geo} Geo-accumulation index	评价结果 Evaluation
0级 Level 0	$I_{geo} \leq 0$	清洁
1级 Level 1	$0 < I_{geo} \leq 1$	轻度污染
2级 Level 2	$1 < I_{geo} \leq 2$	轻中度污染
3级 Level 3	$2 < I_{geo} \leq 3$	中度污染
4级 Level 4	$3 < I_{geo} \leq 4$	偏重度污染
5级 Level 5	$4 < I_{geo} \leq 5$	严重污染
6级 Level 6	$I_{geo} > 5$	极严重污染

含量由高至低均为 Zn>Pb>Cu>As>Hg>Cd (表 5), 参考海洋沉积物评价标准, 沉积物重金属含量符合第一类海洋沉积物质量标准。在海洋牧场示范区内 (A—C), 2020 年沉积物重金属整体变异程度不高, 状态相对稳定, 2021 年示范区内 Cd (95.35%) 和 Hg (50.84%) 为高度变异, 存在较大的空间离散性。示范区附近海域结果表明 2020 年 Cd 存在高

度变异 (40.49%), 2021 年均为低变异。2020 年调查示范区附近海域 (D₁) Cd 未达检出限的样品数量占比超过总样品的 50% (以检出限的 1/4 统计); 2021 年调查示范区附近海域 (D₂) 未达检出限的样品数量占比不足总样品的 50% (以检出限的 1/2 统计), 因此 Cd 变异系数意义不大。本研究区域内, Hg 应为沉积物的重点关注对象。

表5 表层沉积物中重金属变异系数及其含量
Table 5 Coefficient of variation and statistics of heavy metals in surface sediments

年份 Year	区域 Area	重金属质量分数 Mass fraction of heavy metal/(mg·kg ⁻¹)					
		铜 Cu	铅 Pb	锌 Zn	镉 Cd	汞 Hg	砷 As
2020	A—C	13.34	9.64	26.83	15.87	15.30	10.89
	D ₁	24.71	18.95	23.59	40.49	12.62	13.92
2021	A—C	24.73	12.02	10.83	95.35	50.84	3.94
	D ₂	12.85	18.39	7.10	0.00	13.79	1.08
总均值 Total mean		15.21	27.64	95.93	0.03	0.05	7.23
质量标准 Quality standard		35.0	60.0	150.0	0.5	0.2	20.0

2020 年沉积物重金属空间分布如图 2 所示, 重金属元素含量整体沿南侧外海方向降低。Cu、Zn 最大值出现在外伶仃岛西侧海域, Zn 在岛东侧也存在对称分布的高值区。Pb 高值区较为分散, 呈西北至东南方向条带状分布, Cd、Hg 实测值较低, 部分站位未达检出限, 整体分布随离岸距离的增加而逐步降低, As 最大值则出现在外伶仃岛东南方向。

2021 年调查范围为外伶仃海洋牧场示范区 (A—C), 沉积物重金属空间分布见图 3, 各重金属含量空间差异较大, 结果与离岸距离成反比。按区域看, Cu、Zn、Hg 等 3 种重金属具有相似的空间分布规律, 在外伶仃岛东北侧原人工鱼礁区 (A) 有较明显的高值区, 同时逐步向东南侧示范区人工鱼礁区 (B) 降低。Pb 在海域 A 含量最高并逐步向东侧示范区礁区外海域 (C) 降低, 在区域 B 及 C 含量较低。Cd 的最大值则出现在东南侧区域 B, 整体沿岛屿东侧岸线向东降低。As 的高值出现在区域 B, 呈现逐步向区域 A 及东北部区域 C 扩散降低的趋势。

2.2 表层沉积物粒度组成分析

沉积物的粒度组成和变化与环境条件密切相关。沉积物按粒径可分为黏土 (<0.004 mm)、粉砂 (0.004~0.063 mm)、砂 (0.063~2 mm) 和砾石

(>2 mm) 4 类。外伶仃海洋牧场示范区及其附近海域各站位沉积物的平均粒径为 0.014~0.153 mm, 其中粉砂占比变幅为 25.09%~38.55%, 平均值为 29.62%, 较稳定, 黏土占比变幅为 15.81%~58.56%, 平均值为 52.30%, 砂占比变幅为 12.61%~54.60%, 平均值为 18.08%, 变幅均较大。沉积物的分类和命名采用谢帕德沉积物粒度分类三元相图 (图 4), 调查海域沉积物主要类型为粉砂质黏土 (占比 87.88%)。原人工鱼礁区 (A) 及示范区人工鱼礁区 (B) 沉积物粉砂及砂占比较高, 示范区礁区外海域 (C) 沉积物类型整体偏黏土, 示范区附近海域 (D₁ 和 D₂) 沉积物兼具偏黏土及偏粉砂类型, 同时 9.10% 站位的粒度分析结果为砂-粉砂-黏土混合类型。区域 A 大东湾沉积物粒度分析结果为粉砂质砂, 其中砂含量达 54.60%, 黏土含量仅为 15.81%。

2.3 重金属相关性和同源性分析

沉积物重金属与有机碳、硫化物、粒度含量的相关性热图见图 5, 椭圆面积代表相关性绝对值大小, 椭圆方向代表正、负相关性。所选分析指标中, TOC 与 6 种重金属均具有较高的正相关性, 其中 Cu、Zn 与 TOC 呈极显著正相关性 ($p<0.01$), Pb 与 TOC 呈显著正相关性 ($p<0.05$)。硫化物与 Cd、Hg、As 呈正相关性, 其中与 Cd 呈极显著正相关性 ($p<0.01$)。黏土与 As 呈显著正相关性

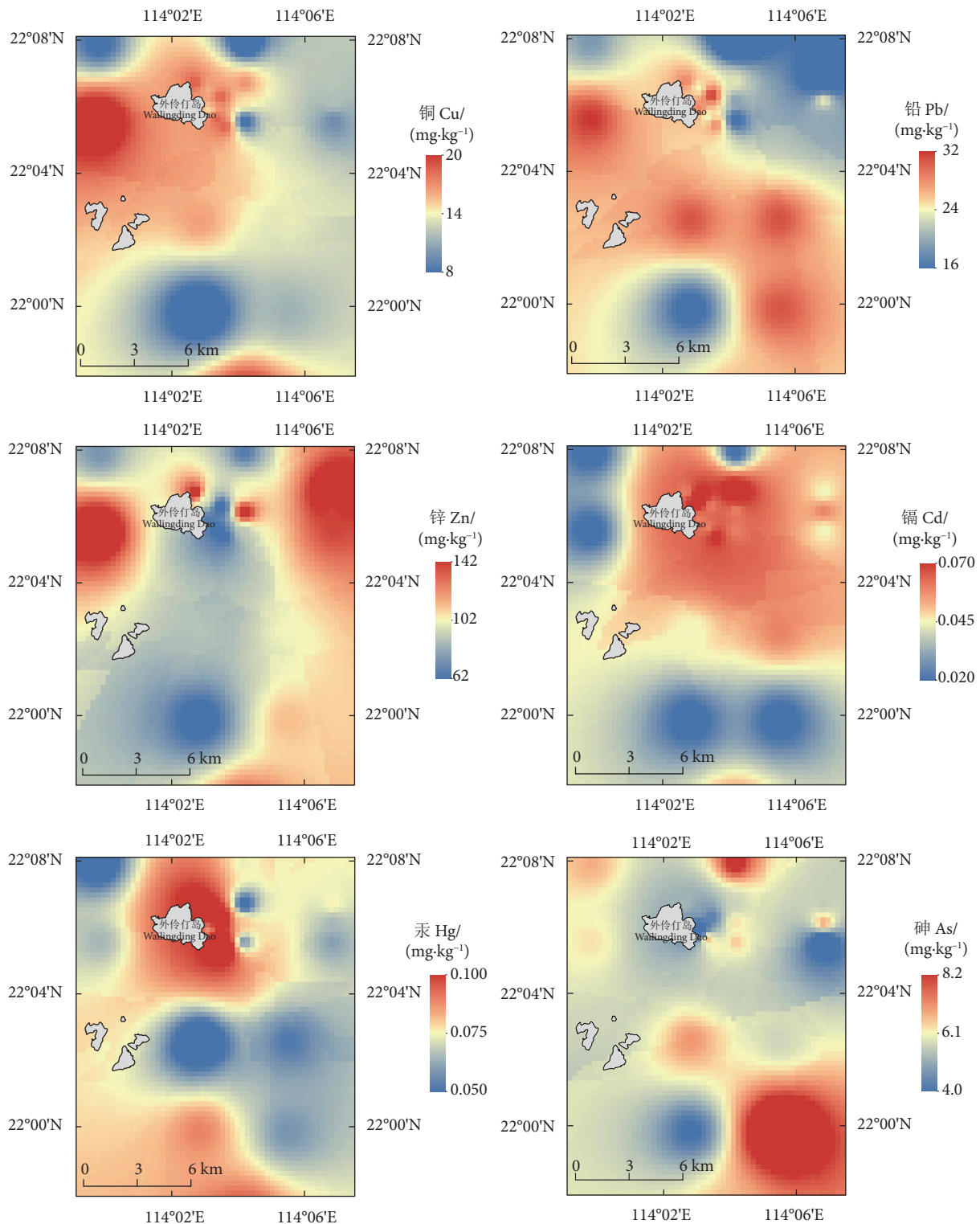


图2 表层沉积物重金属空间分布 (2020年)

Fig. 2 Concentration distribution of heavy metals of surface sediments (2020)

($p < 0.05$), 与其他 5 种重金属呈负相关性。重金属间, Cu 与 Zn 呈极显著正相关性 ($p < 0.01$), Pb 与 Zn 呈显著正相关性 ($p < 0.05$), Cu 与 Pb 也具有一定的相关性, 结果表明在某种程度上三者间可能存在相同来源。

主成分分析 (PCA) 是一种以降维为核心, 通过正交变换简化复杂数据的统计分析方法, 在分析海水及沉积物重金属来源等方面应用广泛。为进一步了解重金属的潜在来源, 在原始数据归一化处理的基础上进行主成分分析。以特征值大于 1、累计

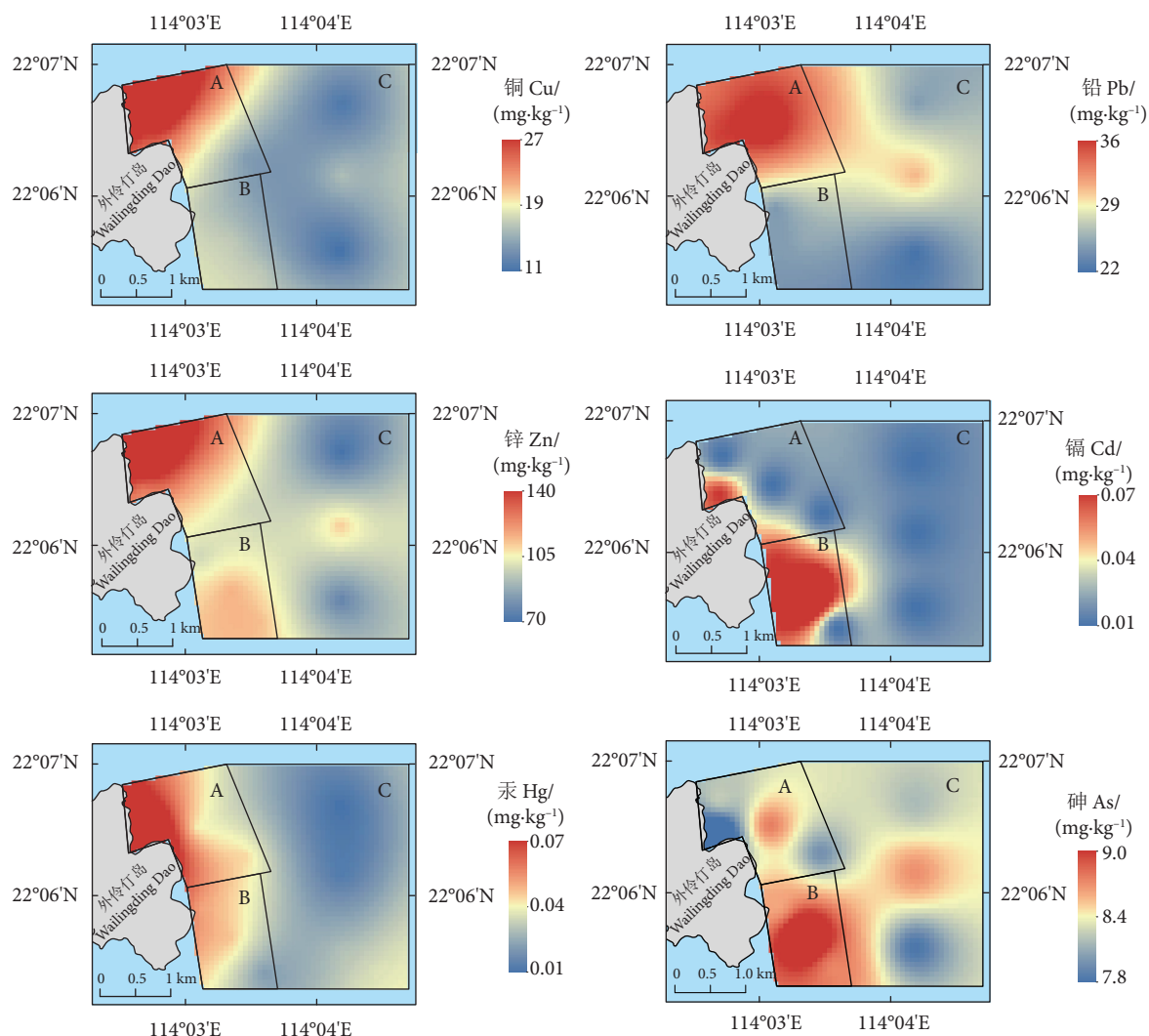


图3 表层沉积物重金属空间分布 (2021年)

Fig. 3 Concentration distribution of heavy metals of surface sediments (2021)

贡献率大于 80% 为限定条件, 提取 3 个主成分 (PC1、PC2 和 PC3), 得到 6 种重金属元素及 TOC、硫化物、沉积物粒径的主成分分析结果 (表 6)。3 个主成分方差贡献率分别为 31.25%、30.72% 和 24.04%, 累计可解释总因子 86.01% 的信息。其中, PC1 中 Hg、As、黏土和砂的载荷较高 (>0.85), PC2 中 Cu、Pb、Zn 和 TOC 的载荷较高 (>0.65), PC3 中 Cd、硫化物和粉砂的载荷较高 (>0.75)。

2.4 重金属潜在生态风险评价

2.4.1 内梅罗综合污染指数评价

调查海域表层沉积物重金属的综合污染指数评价结果见图 6。图中方框上、中、下横线分别表示上四分位数、中位数及下四分位数, 上下方横线代表最大值和最小值。2020 和 2021 年的内梅罗综合污染指数 (P) 变化范围分别为 0.39~0.73 (平均值

0.54) 和 0.42~0.62 (平均值 0.51)。对沉积物 P 指数评价结果开展差异性检验, 2020 及 2021 年外伶仃海洋牧场与示范区附近海域存在显著性差异 ($p < 0.05$)。依据相应评价标准, 调查范围内沉积物整体属 1 级清洁水平。按不同区域来看, 2020 年沉积物 P 指数显示, 示范区人工鱼礁区 (B)、示范区礁区外海域 (C) 及示范区附近海域 (D_1) 均普遍高于原人工鱼礁区 (A), 个别站位 P 指数略超出 1 级, 2021 年 P 指数为清洁水平。

2.4.2 潜在生态风险指数评价

以南海陆架区表层沉积物重金属含量为参比值的重金属潜在生态风险评价结果见表 7。在由原人工鱼礁区 (A)、示范区人工鱼礁区 (B) 和示范区礁区外海域 (C) 所组成的海洋牧场示范区 (A—C) 范围内, 2020 和 2021 年的综合污染系数分别为 10.67 和 8.33, 均属于 2 级污染水平 ($6 \leq C_d < 12$), 其中区

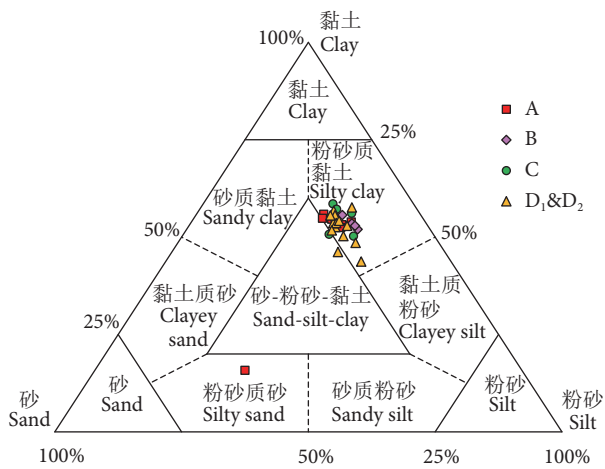


图4 谢帕德法沉积物分类图

A. 原人工鱼礁建设区域站位; B. 外伶仃海洋牧场人工鱼礁建设区站位; C. 海洋牧场示范区礁区外站位; D₁&D₂. 海洋牧场示范区附近海域站位。

Fig. 4 Classification of Shepard's sediment method

A. Sampling site of original artificial reef area; B. Sampling site of artificial reef area in marine ranching demonstration zones in Wailingding; C. Sampling site off artificial reef area; D₁&D₂. Sampling site off marine ranching demonstration zones.

域 A 和 B 污染系数较高，整体呈由近岸逐步向四周开阔海域降低的趋势，示范区附近海域 (D₁ 和 D₂) C_d 虽同属于 2 级污染水平，但系数低于同年度海洋牧场区 (A—C)。由不同年份调查区域各重金

属的 E_r^i 可知，除 Hg 外其他重金属的 E_r^i 均低于 40，为轻微生态风险水平。Hg 在 2020 年海洋牧场区 (A—C) 和附近海域 (D₁) 的 E_r^i 分别为很强 ($160 \leq E_r^i < 320$) 和较强 ($80 \leq E_r^i < 160$) 潜在生态风险，2021 年 Hg 潜在生态风险为中等 ($40 \leq E_r^i < 80$)。2020 年海洋牧场区 (A—C) 综合潜在生态风险指数 (RI) 平均值为 209.06，综合潜在生态风险指数为强水平，高于附近海域 (D₁)，2021 年海洋牧场区 (A—C) RI 平均值为 93.75，综合潜在生态风险指数为中等水平，略高于附近海域 (D₂)。这 2 年的 RI 结果均表明，与综合污染系数变化趋势类似，原人工鱼礁区 (A) 的潜在生态风险最高，生态风险与离岸距离呈反比。

2.4.3 地累积指数评价

地累积指数反映的评价结果与潜在生态风险指数具有相似的变化趋势 (表 8)。在 2020 和 2021 年的调查中，重金属 Cd 和 As 在海洋牧场区 (A—C) 及示范区附近海域 (D₁ 和 D₂) 的 $I_{geo} < 0$ ，污染等级为 0 级清洁，Cu、Pb 及 Zn 的 I_{geo} 介于 0~1，污染等级为 1 级轻度污染。Hg 作为重点关注对象，在 2020 和 2021 年地累积指数结果差异明显，2020 年结果显示海洋牧场区 (A—C) 内 Hg 的 I_{geo} 均值为

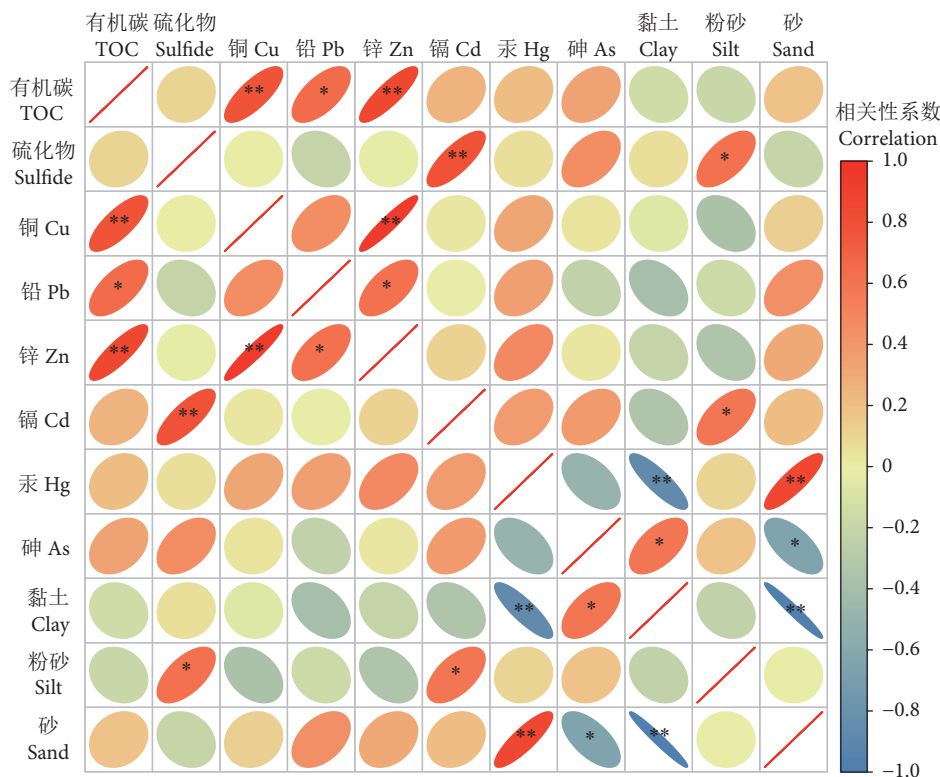


图5 表层沉积物重金属、有机碳、硫化物和粒度的相关性热图

Fig. 5 Correlation heat map among heavy metals, TOC, sulfide and particle size in surface sediments

表6 表层沉积物主成分分析
Table 6 Principal component analysis of sediments

主成分因子 Principal component	主成分 1 PC1	主成分 2 PC2	主成分 3 PC3
特征值 Eigenvalue	3.44	3.38	2.65
方差贡献率 Variance contribution rate/%	31.25	30.72	24.04
累计方差贡献率 Cumulative variance contribution rate/%	31.25	61.97	86.01
铜 Cu	0.018	0.916	-0.073
铅 Pb	0.382	0.650	-0.158
锌 Zn	0.170	0.964	-0.031
镉 Cd	0.186	0.136	0.924
汞 Hg	0.872	0.284	0.192
砷 As	-0.748	0.204	0.499
有机碳 TOC	-0.006	0.940	0.155
硫化物 Sulfide	-0.165	0.021	0.904
黏土 Clay	-0.968	-0.081	-0.158
粉砂 Silt	0.127	-0.358	0.779
砂 Sand	0.963	0.167	-0.021

1.51 ($1 < I_{geo} \leq 2$), 污染等级达到 2 级轻中度污染水平, 示范区附近海域结果相似, 2021 年结果有所降低, 为清洁水平 ($I_{geo} \leq 0$)。地累积指数评价中也可知 2020 年 Hg 存在较大的空间离散性, 需要重点关注。以划分的不同调查区域来看, 高污染区主要位于近岸原人工鱼礁区 (A), 与其同为近岸海域

表7 表层沉积物重金属潜在生态风险指数
Table 7 Potential ecological risk index of heavy metal in sediments

年份 Year	调查区域 Survey area	综合污染系数 C_d	潜在生态风险系数 E_r					综合潜在生态风险指数 RI	
			铜 Cu	铅 Pb	锌 Zn	镉 Cd	汞 Hg		砷 As
2020	A	11.38	10.68	9.28	1.72	9.44	190.67	5.81	227.60
	B	10.80	10.54	9.08	1.33	8.89	186.67	5.82	222.32
	C	9.84	8.93	7.87	1.96	9.44	142.67	6.37	177.24
	A—C 均值 Mean of A—C	10.67	10.05	8.75	1.67	9.26	173.33	6.00	209.06
	D ₁	9.85	8.87	8.26	1.91	5.61	147.45	6.47	178.56
2021	A	9.57	12.82	10.58	1.86	2.92	83.50	8.43	120.11
	B	8.35	11.62	8.66	1.78	6.67	56.00	8.92	93.65
	C	7.08	9.51	8.91	1.55	1.67	37.33	8.52	67.49
	A—C 均值 Mean of A—C	8.33	11.32	9.39	1.73	3.75	58.94	8.62	93.75
	D ₂	7.67	9.74	8.35	1.68	1.67	58.00	8.71	88.15

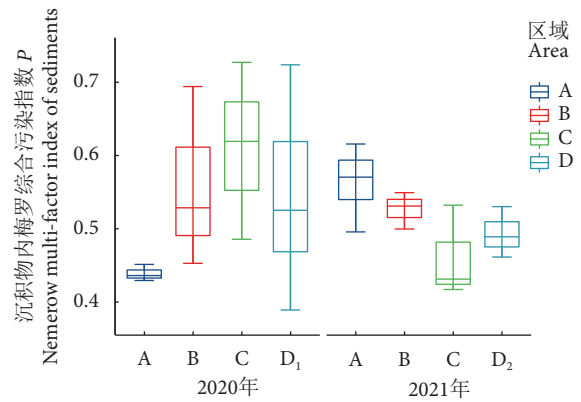


图6 沉积物重金属内梅罗综合污染指数

Fig. 6 Nemerow pollution index of heavy metals in sediments

的示范区人工鱼礁区 (B) 结果略低, 示范区附近海域 (D₁ 和 D₂) 的 I_{geo} 低于其他区域。

3 讨论

3.1 沉积物重金属分布特征

重金属是一种具有长期累积特征的污染物, 在不同外界条件作用下, 同一海域的沉积物重金属呈现不同的分布特征, 流场、潮汐、底质类型、地形等因素均可直接或间接影响重金属的含量及分布。外伶仃是珠三角地区进出南太平洋国际航线的水道, 本研究的调查在同一季节开展, 因此不考虑季节性变化影响。受外伶仃岛本身的自然地貌作用及其东侧海域人工鱼礁投放的影响, 使海底构筑物密度大, 从而造成小尺度范围内的流场发生改变, 与

表8 表层沉积物重金属地累积指数
Table 8 Geo-accumulation index of heavy metal in sediments

年份 Year	调查区域 Survey area	地累积指数 I_{geo}					
		铜 Cu	铅 Pb	锌 Zn	镉 Cd	汞 Hg	砷 As
2020	A	0.51	0.31	0.15	-2.27	1.67	-1.37
	B	0.49	0.28	-0.18	-2.35	1.63	-1.39
	C	0.23	0.07	0.36	-2.27	1.24	-1.23
	A—C 均值 Mean of A—C	0.41	0.22	0.11	-2.30	1.51	-1.33
	D ₁	0.20	0.11	0.31	-3.12	1.29	-1.23
2021	A	0.74	0.49	0.31	-4.25	0.37	-0.83
	B	0.63	0.21	0.24	-3.15	-0.14	-0.75
	C	0.30	0.24	0.04	-4.75	-0.72	-0.82
	A—C 均值 Mean of A—C	0.56	0.31	0.20	-4.05	-0.16	-0.80
	D ₂	0.37	0.14	0.16	-4.75	-0.06	-0.78

许多类似岛礁的调查结果相似, 本研究中 2 次调查的沉积物重金属含量分布均呈现自近岸向远海逐渐降低的趋势^[22]。沉积物受地形、地貌和水动力影响, 通过侵蚀、运移、堆积等形成不同特征的底质区域。侵蚀区主要在岛礁近岸形成, 一般为破碎的岩石及珊瑚等坚硬、粗糙的底质, 堆积区主要为细粒沉积物, 运输区则具有不连续的堆积和运输特征。不同粒径沉积物由于结构和特性差异, 对重金属的吸附和富集能力各不相同, 某些重金属具有亲颗粒性, 容易被悬浮物以迁移方式带入沉积物中, 例如较细的粒径表现为对重金属的悬浮搬运作用^[23]。以谢帕德法分类可知本研究区域主要为粉砂质黏土, 整体颗粒偏细, 重金属通过主动吸收或被动吸附的方式, 以颗粒物为介质, 从水体转移至沉积物中^[24]。伶仃洋南部表层泥沙主要向西北运移^[25], 外伶仃岛东侧附近海域中底层余流在潮汐作用下主要为向岸余流, 沉积物净运输方向也为西北向^[26], 由于岛礁阻拦及底部礁体的存在, 沉积物在近岸礁区内沉降, 沉积物及其吸附的重金属等化学元素的向外迁移受到阻滞, 重金属含量与离岸距离呈反比, 与本调查结果一致。重金属的分布和离散程度受自然条件和人为因素影响, Hg 的高度变异表现出较大的空间离散性, 说明存在异常值和空间分布不均的现象。重金属含量高值区在大东湾近岸海域, 空间分布呈近岸高于远岸的特征, 可能与岛礁人类活动影响及岛礁外海水交换频繁有关。本研究中重金属含量与近年来长江口^[27]及柘林湾黄

冈河口^[28]表层沉积物中重金属的研究结果基本一致, 低于 2019 年珠江口附近的调查结果^[29]。

3.2 沉积物重金属来源分析

调查海域各重金属元素受到本底环境、外源输入、大气沉降及人为活动等因素的综合影响, 通过相关性分析沉积物重金属的来源。沉积物中 Hg 含量的高值区主要分布在岛礁东北已建人工鱼礁区, 北侧为香港长洲岛及南丫岛, As 的高值区则位于岛礁东南海洋牧场示范区建礁区, 二者均处于岛礁近岸海域。As 在自然界中天然来源较少, 某些形式的 As 具有很强的毒性, 在水生系统中的表现非常特殊。Hg 和 As 主要来源于工业生产及底质条件富集, 与沉积物中黏土、砂所占比例显著相关^[30], 作为沉积物中的有机质, TOC 的络合作用可增加重金属在沉积物中的累积^[31], 降解作用则促进重金属由沉积物释放至海水中, 从而降低沉积物的重金属含量。近年来伶仃洋东部海域沉积物有机碳的增多可能与疏浚挖砂等人类活动造成了早期较老沉积物的重新暴露有关, 同时因盐度锋阻隔和海水稀释作用, 陆源 TOC 输入量极少, 海源 TOC 净存量较高^[32]。TOC 与 Cu、Pb、Zn 含量呈显著正相关, 表明重金属在沉积物中的含量受到 TOC 影响明显。珠江口高度发达的城镇化进程和社会经济发展对重金属影响明显, 张起源等^[33]对广东沿海沉积物重金属研究表明 Cu、Pb、Zn 与国内生产总值 (GDP) 呈显著正相关。大气沉降是重金属 Pb 累积的重要原因之一, 珠三角燃煤机组大气 Pb 排放

量位居省内首位^[34]。硫化物也是沉积物重金属迁移转化的重要环境因素, 镉离子 (Cd^{2+}) 可与硫离子 (S^{2-}) 通过一系列反应生成重金属硫化物沉淀并析出, 当外界环境如氧化还原电位等发生变化时再次重新释放^[35]。外伶仃岛作为旅游海岛, 海上娱乐项目众多, 同时万山群岛作为我国的著名渔场, 各类渔船捕捞作业也带来了一定程度的环境污染。

3.3 海洋牧场建设对沉积物重金属生态风险的影响

珠江口地区经济发达, 人类活动频繁, 与其他区域相比沉积物重金属含量显著偏高, 发达的经济和工业化生产水平带来了更高的生态风险^[36], 同时沉积物重金属比海水重金属具有相对更明显的时间稳定性, 其所容纳重的金属浓度通常比海水更高。生态风险评价是综合预测和评估重金属在生态环境中危险指数的途径, 也是对污染提出控制策略的诊断工具, 可用有限的样本和参数以快速、便捷和标准化的途径确定生态风险状态。评价方法利用重金属工业化前的背景值及相应的毒性系数加权计算求得综合潜在生态风险指数 RI, 毒性系数的加入可得到比单纯污染评价更好的分辨率和更全面、充分的结果, 从而更准确地定量划分危害等级^[37]。Hg 是一种生物毒性极强的重金属, 虽然与其他重金属相比含量很低, 但因为自身较强的生物毒性, 对潜在生态风险指数的贡献最大。从沉积物的 E_i 和 RI 可发现, Hg 的潜在生态指数明显高于其他 5 种重金属, 污染指数和风险权重最大, 是主要的风险污染源。潜在生态风险评价结果表明综合评价为中等至强风险, 这与海州湾人工鱼礁海域^[38]、广西北部湾海域^[39] 及盘锦双台子河口^[40] 等研究区域的结果基本一致。按区域来看近岸原人工鱼礁区 (A) 综合污染程度相对较高, 其次为同属岛礁近岸的区域 B, 污染趋势与重金属含量分布类似, 分析原因可能与外伶仃海洋牧场示范区内礁体投放海域构筑物导致水动力和沉降粒径特征改变有关。Hg 虽然为最主要的污染因子, 但其他因子的 2 次生态风险评价结果变化不大, 说明在 2020 年调查时段内可能存在未知的临时性污染情况, 从而提高了整体的风险等级。沉积物重金属累积指数表明除 Hg 外, Cu 也需要重点关注。本研究海域虽暂未出现极严重污染, 但鉴于重金属的累积特性和生态环境的脆弱性, 海域重金属污染变化趋势仍应引起相关责任部门的重视和关注, 需长期重点关切并开展进一步的调查研究。

4 结论

通过对珠海外伶仃国家级海洋牧场示范区及其附近海域表层沉积物重金属含量的分析和生态风险评价, 发现这些区域的重金属含量处于低污染水平, 均符合所在海域的海洋功能区划及国家级海洋牧场示范区的建设标准。外伶仃岛周边近岸海域的表层沉积物在各项指标上普遍高于远岸海域, 部分重金属显示出较大的空间离散性, 其来源也相对复杂。珠海外伶仃国家级海洋牧场示范区位于珠江口近岸浅海区域, 受到珠江径流汇入等自然因素及粤港澳大湾区经济发展带来的港口、码头、航道等人为因素的共同影响, 可能导致海区环境的不稳定, 增加了调查结果的偶然性。虽然鱼礁投放后的阻滞效应和岛礁地形在一定程度上导致近岸区域的重金属含量高于其他区域, 但目前海洋牧场的建设并未在短期内显著增加示范区内沉积物的重金属生态风险。根据该海域重金属污染的程度及其空间变化特征, 外伶仃岛周边海域的生态风险仍然相对较高。目前对于特定生态环境的干扰因素通常难以区分是自然波动、扰动还是人为因素, 这限制了对生态风险因子和指数的全面评估, 进而做出明确的判断。鉴于该区域是重要的渔场和敏感区域, 必须持续关注人类活动等非生物因素可能对环境造成的风险。在未来现代化海洋牧场建设中, 需综合考量选址问题, 避免过度集中于近岸区域, 而应考虑向远岸区域拓展。此外, 为了全面掌握海洋牧场建设对沉积物的长期影响, 应加强对敏感区域沉积物环境质量的跟踪监测, 同时深入研究重金属的迁移扩散机制, 为海洋牧场的规划和建设提供参考依据。

参考文献:

- [1] 冯顺楼. 开创海洋渔业新局面的一个重要措施: 从我国海洋渔业潜在危机看人工鱼礁建设的必要性[J]. 福建水产, 1983(4): 20-23.
- [2] HERATH I, VITHANAGE M, BUNDSCHUH J. Antimony as a global dilemma: geochemistry, mobility, fate and transport[J]. *Environ Pollut*, 2017, 223: 545-559.
- [3] ZHANG C, YU Z G, ZENG G M, et al. Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability[J]. *Environ Int*, 2014, 73: 270-281.
- [4] BENSON N U, UDOSSEN E D, ESSIEN J P, et al. Geochemical fractionation and ecological risks assessment of benthic sediment bound heavy metals from coastal ecosystems off the Equatorial Atlantic Ocean[J]. *Int J Sediment Res*, 2017, 32(3): 410-420.

- [5] 杨文超, 黄道建, 陈继鑫, 等. 大亚湾 2010—2018 年表层沉积物中重金属含量时空分布及生态风险评价[J]. 南方水产科学, 2020, 16(4): 39-46.
- [6] 张明燁, 田涛, 吴忠鑫, 等. 鲑鱼圈海域鱼礁区投礁前的生态环境调查评估[J]. 水产学杂志, 2021, 34(2): 76-85.
- [7] 陈勇, 温泽民, 尹增强, 等. 辽宁大长山海洋牧场拟建海域表层沉积物重金属潜在生态风险的评价[J]. 大连海洋大学学报, 2015, 30(1): 89-95.
- [8] 贾婷婷, 高燕, 侯纯强, 等. 渤海湾近岸人工鱼礁区表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2015, 32(12): 1092-1096.
- [9] 李大鹏, 张硕, 张中发, 等. 基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究[J]. 环境科学, 2017, 38(11): 4525-4536.
- [10] 石一茜, 赵旭, 俞锦辰, 等. 马鞍列岛人工鱼礁修复海域沉积物重金属形态组成及垂直分布特征[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 1952-1962.
- [11] 谢笑艳, 陈丕茂, 佟飞, 等. 珠海外伶仃岛海域海洋牧场选址探讨[J]. 南方水产科学, 2022, 18(5): 18-29.
- [12] 冯雪, 范江涛, 孙晓, 等. 珠海外伶仃人工鱼礁对鱼类资源养护效果初步评估[J]. 南方农业学报, 2021, 52(12): 3228-3236.
- [13] 冯雪, 戴小杰, 范江涛, 等. 外伶仃海洋牧场附近海域渔业资源季节动态变化分析[J]. 南方水产科学, 2023, 19(5): 32-38.
- [14] 朱嘉, 刘建辉, 蔡晓琼. 珠江口外伶仃岛海滩修复研究[J]. 海洋开发与管理, 2014, 31(11): 36-40.
- [15] 章守宇, 张焕君, 焦俊鹏, 等. 海州湾人工鱼礁海域生态环境的变化[J]. 水产学报, 2006, 30(4): 475-480.
- [16] 刘丽华. 福建省西南近岸海域表层沉积物重金属污染特征与风险评价[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(2): 200-207.
- [17] BRADY J P, AYOKO G A, MARTENS W N, et al. Development of a hybrid pollution index for heavy metals in marine and estuarine sediments[J]. Environ Monit Assess, 2015, 187(5): 306.
- [18] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. Water Res, 1980, 14(8): 975-1001.
- [19] 张远辉, 杜俊民. 南海表层沉积物中主要污染物的环境背景值[J]. 海洋学报, 2005, 27(4): 161-166.
- [20] MÜLLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. GeoJournal, 1969, 2: 108-118.
- [21] XU G, LIU J, PEI S F, et al. Sediment properties and trace metal pollution assessment in surface sediments of the Laizhou Bay, China[J]. Environ Sci Pollut Res, 2015, 22(15): 11634-11647.
- [22] 张朋朋, 胡蕾, 王小丹, 等. 长岛北四岛海洋牧场海域环境适宜性分析[J]. 山东国土资源, 2022, 38(5): 54-62.
- [23] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 197.
- [24] COTTÉ-KRIEF M, THOMAS A J, MARTIN J. Trace metal (Cd, Cu, Ni and Pb) cycling in the upper water column near the shelf edge of the European continental margin (Celtic Sea)[J]. Mar Chem, 2002, 79(1): 1-26.
- [25] 张涛, 牛丽霞, 何方婷, 等. 人类活动影响下伶仃洋沉积格局演变特征[J]. 沉积学报, 2022, 40(3): 753-764.
- [26] 肖志建, 李团结, 廖世智. 伶仃洋表层沉积物特征及其泥沙运移趋势[J]. 热带海洋学报, 2011, 30(4): 58-65.
- [27] LIU R M, MEN C, LIU Y Y, et al. Spatial distribution and pollution evaluation of heavy metals in Yangtze estuary sediment[J]. Mar Pollut Bull, 2016, 110(1): 564-571.
- [28] WANG Z H, FENG J, JIANG T, et al. Assessment of metal contamination in surface sediments from Zhelin Bay, the South China Sea[J]. Mar Pollut Bull, 2013, 76(1/2): 383-388.
- [29] 陈斌, 吕向立, 王中媛, 等. 珠江口表层沉积物重金属潜在生态风险及生物富集评价[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(7): 73-82.
- [30] SONG H Y, LIU J Q, YIN P, et al. Distribution, enrichment and source of heavy metals in Rizhao offshore area, southeast Shandong Province[J]. Mar Pollut Bull, 2017, 119(2): 175-180.
- [31] LOSKA K, WIECHUŃ D. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir[J]. Chemosphere, 2003, 51(8): 723-733.
- [32] 刘广州, 胡嘉镗, 李适宇. 珠江口夏季海陆源有机碳的模拟研究: 分布特征、贡献比重及其迁移转化过程[J]. 中国环境科学, 2020, 40(1): 162-173.
- [33] 张起源, 刘谓承, 赵建刚, 等. 广东沿海沉积物重金属含量及风险评价[J]. 中国环境科学, 2018, 38(12): 4653-4660.
- [34] 陈耿. 广东省煤电行业大气铅污染现状分析[J]. 环境监测管理和技术, 2016, 28(1): 24-26, 63.
- [35] 陈淑梅, 王菊英, 马德毅, 等. 酸溶硫化物与沉积物中重金属化学活性的关系[J]. 海洋环境科学, 1999, 18(3): 16-21.
- [36] 李青生, 王翠, 蒋金龙, 等. 九龙江口表层沉积物重金属的污染特征与来源分析[J]. 海洋科学, 2020, 44(12): 32-43.
- [37] 郑懿珉, 高茂生, 刘森, 等. 莱州湾表层沉积物重金属分布特征及生态环境评价[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(3): 354-360.
- [38] 卢璐, 张硕, 赵裕青, 等. 海州湾人工鱼礁海域沉积物中重金属生态风险的分析[J]. 大连海洋大学学报, 2011, 26(2): 126-132.
- [39] 陈海南, 张春华, 刘国强, 等. 广西北部湾沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境化学, 2022, 41(9): 2872-2879.
- [40] 程嘉熠, 王晓萌, 杨正先, 等. 双台子河口沉积物重金属溯源及生态风险评估[J]. 中国环境科学, 2021, 41(3): 1345-1353.